

餐厨垃圾联合厌氧消化研究进展

唐朝春*, 段先月, 陈惠民, 叶鑫

(华东交通大学土木建筑学院, 江西南昌 330013)

摘要:介绍了餐厨垃圾组成、特点及其未经处理带给人们的危害。简介了我国餐厨垃圾处理现状、处理方式及厌氧消化原理。详细阐述了餐厨垃圾与牛粪、猪粪、污泥、秸秆、中国银草、毛竹叶、稻草, 及猪粪和污泥等联合厌氧消化产甲烷的情况。得出了 pH 为 7 时及经热、化学、超声波、预处理后餐厨垃圾厌氧消化产气量均能达到最佳值。指出了餐厨垃圾联合厌氧消化过程中出现挥发性有机酸和氨氮抑制现象, 可以通过混合物比例及控制有机负荷率来解决上述问题。总结表明了餐厨垃圾联合厌氧消化今后研究热点主要是联合厌氧消化后所产生液体的后续处理。

关键词:餐厨垃圾; 联合厌氧消化; 甲烷

中图分类号: X56

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)04-0034-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.04.008

Research progress of anaerobic digestion of food waste

TANG Chao-chun*, DUAN Xian-yue, CHEN Hui-min, YE Xin

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The composition, characteristics and hazards of food waste are introduced. Current situation of garbage disposal in China, food processing and the principle of anaerobic digestion are reviewed. Methane production by anaerobic co-digestion of kitchen waste, cattle manure, pig manure, sewage sludge, straw, China silvergrass, moso bamboo leaves is described in detail. The anaerobic co-digestion of pig manure and sludge are also elaborated. The optimal methane yield can be achieved after treating the food waste under heat, chemical and ultrasonic conditions at 7 of pH value. However, during the anaerobic co-digestion of food waste, volatile organic acid and ammonia inhibition phenomenon take place, which can be solved by adjusting the ratio of mixture components and controlling the organic loading rate. Finally, it is proposed that the treatment of waste liquid from anaerobic co-digestion of food waste will become the main research direction in the future.

Key words: kitchen waste; anaerobic co-digestion; methane

随着我国社会经济的发展,人民生活水平的提高,城市化进程的加快,餐厨垃圾产量增长速度也越来越快。就目前来看,我国城市生物垃圾 1 年产量可达 1.5 亿 t, 而其中约有一半为餐厨垃圾, 其含水量高, 易腐烂变臭^[1]。

作为一个农业大国, 2012 年我国稻草秸秆产量已达到 2.16 亿 t, 其主要的处理方式是露天焚烧, 玉米秸秆处理方式与此类似, 秸秆焚烧排出大量的有毒空气污染物, 会影响环境^[2]; 而且此做法易引起火灾; 大规模的禽畜养殖、城市建设, 导致粪便污泥产量的增长。厌氧消化不仅可以处理上述垃圾, 还能回收能源, 可谓一举两得。

厌氧消化是一种环境友好的垃圾处理方法^[3]。而联合厌氧消化更是有助于垃圾处理, 因为厌氧消化适宜的 C/N 为 10~20, 餐厨垃圾 C/N 为 15~20, 和其他生物质混合厌氧可以促使 C/N 稳定在一个较适宜的范围。联合厌氧消化还可促进物料的营养平衡, 提高单位体积的产气量, 在餐厨垃圾处理这方面是很有前途的^[4]。餐厨垃圾单独厌氧消化会导致

挥发性脂肪酸的积累, 降低系统的 pH, 从而导致厌氧消化进程产气量降低。但以餐厨垃圾为底物进行联合厌氧消化, 可很好地解决影响厌氧消化的问题。

1 餐厨垃圾组成、特点及其危害

1.1 餐厨垃圾组成

餐厨垃圾来源于学校、家庭、食堂及餐饮行业等产生的食物加工下脚料和食用残余, 主要是由水果皮、蔬菜、饭面、肉类、骨头以及废餐具、塑料纸巾等多种物质组成^[5]。

1.2 餐厨垃圾特点

餐厨垃圾有以下 5 大特点: ①有机物质量分数 70% 以上, 餐厨垃圾水质量分数为 65%, 不便运输^[6]; ②富含磷、氮、钙、钾以及各种微量元素; ③存有病原菌、病原微生物; ④易腐烂变质发臭滋生蚊虫; ⑤易产生且量大, 产生面广。

1.3 未经处理的餐厨垃圾的危害

未经处理的餐厨垃圾有 3 大危害: ①餐厨垃圾在腐败过程中散发出的刺激性气体有害人体健康;

收稿日期: 2015-09-22; 修回日期: 2016-01-29

基金项目: 江西省科技厅支撑计划项(2009AE01601); 江西省自然科学基金项目(20132BAB203033)

作者简介: 唐朝春(1964-), 男, 教授, 主要从事水处理理论与技术研究, 通讯联系人, 0791-87046028, tangcc1964@163.com。

②餐厨垃圾不及时处理会影响城市生态环境,造成垃圾围城现象^[7];③餐厨垃圾未经处理长期堆放会产生垃圾渗滤液,污染地下水体。

2 我国餐厨垃圾处理现状、处理方式

2.1 我国餐厨垃圾处理现状

随着我国经济快速发展,餐厨垃圾产量增长速度也是飞快,每年产量巨大,但是资源化利用率低。北京在2008年1天餐厨垃圾产量超1 200 t,但资源化处理不到20%。现有很多国内城市在探索餐厨垃圾资源化利用模式;同时,有关的标准和政治体系正在形成。

2.2 餐厨垃圾处理方式

目前我国餐厨垃圾处理的方式有:①焚烧、填埋、机械破碎、蚯蚓堆肥、好氧堆肥;②厌氧发酵产氢、乳酸发酵、厌氧消化产沼气;③湿热处理、生产生物柴油、高温炭处理^[8]。

3 厌氧消化原理

对于厌氧消化原理,有二阶段、三阶段和四阶段理论。这里简单介绍四阶段理论。第一阶段是水解和发酵性细菌群将复杂有机物进行水解和发酵;第二阶段是产氢产乙酸菌群把第一阶段的产物进一步分解为乙酸和氢气;第三阶段是在产甲烷菌的作用下,除了将氢气和二氧化碳进行转化生成甲烷外,同时也对乙酸进行脱羧作用产生甲烷;第四阶段是同型产乙酸阶段。

4 餐厨垃圾与粪便、污泥、生物质联合厌氧消化

4.1 餐厨垃圾与粪便联合厌氧消化

4.1.1 餐厨垃圾与牛粪联合厌氧消化

裴占江等^[9]在35℃,初始总固体负荷为6.7%条件下,研究了餐厨垃圾与牛粪不同的配比(0:1、1:1、2:1、3:1、4:1、1:0)对其厌氧消化产沼气的影 响,发现当餐厨垃圾与牛粪比例为2:1时,其联合厌氧消化沼气产量和甲烷含量均最高,分别为574.15 mL/g和69.78%,两者联合厌氧消化单位VS沼气产量和甲烷含量显著提高。

在中温、高温条件下的连续搅拌釜式反应器内,对牛粪:餐厨垃圾:污泥比例为7:2:1进行超声波预处理,发现即使在水力停留时间较低时,也能得到较高的甲烷产量。当为36℃时,甲烷产量为0.85 L/d;在55℃时,甲烷产量0.82 L/d。相对于无超声波进行

预处理,在相应的温度条件下,甲烷产量分别提高了31%和67%^[10]。

李轶等^[11]在温度为37℃条件下,让餐厨垃圾与牛粪进行批式厌氧消化产甲烷,发现当餐厨垃圾与牛粪质量比为2.5:1时,厌氧消化效果最好,其单位产气量为588.02 mL/g,甲烷体积分数最高可为62.8%,有机物去除率达到65.5%。

Li等^[12]在研究餐厨垃圾与牛粪联合厌氧消化时,发现酸化的水力停留时间有助于提高混合物联合厌氧消化产气率。4组混合物比例分别为0:1、1:1、3:1、6:1,将其都在相同的水力停留时间13 d下进行试验测试,但酸化不同的水力停留时间,酸化的水力停留时间为1、2、3 d,混合厌氧消化产甲烷时间为12、11、10 d,结果发现,相较于餐厨垃圾单独厌氧消化餐厨垃圾与牛粪混合厌氧消化甲烷产量提高了0.8~5.5倍。适当的酸化水力停留时间主要取决于基质的生物降解消化性能。当混合物厌氧消化比例为6:1时,试验总共运行时间为1 d+12 d,产气率达到最高值3.97 L/(L·d),因此混合比例为6:1,水力停留时间为1 d的酸化被认为是最佳的。

Zhai等^[13]研究不同pH初始值(6.5、7.0、6.0、7.5、8.0)对餐厨垃圾与牛粪厌氧消化影响,发现当初始pH为7.5,甲烷生产潜力和降解率达到最大值,分别为8 579 mL和179.8 mL/g。

Iqbal等^[14]在37℃研究餐厨垃圾与牛粪联合厌氧消化,发现其降解率较垃圾单独厌氧消化要高,在NaOH质量分数为1.0%、1.5%、2.0%,对垃圾的可生化性和沼气产量都有提高,尤其在NaOH质量分数为1.5%时,沼气产量几乎翻了1番。

餐厨垃圾与牛粪进行联合厌氧,可适应更高的有机负荷和pH的变化,从而使得沼气产量有所提高。

4.1.2 餐厨垃圾与猪粪联合厌氧消化

Ye等^[15]在研究餐厨垃圾与猪粪、稻草配比对其联合厌氧消化产甲烷影响时发现,餐厨垃圾:猪粪:稻草的最佳比为0.4:1.6:1,在这种条件下C/N比为21.7,甲烷体积分数为45.9%~70.0%,有机负荷率降低55.8%,甲烷产量为674.4 L/kg,相较于稻草和猪粪单独厌氧消化其甲烷产量要高出71.67%和10.41%。当餐厨垃圾质量分数超过26%时,挥发性脂肪酸会对沼气的生产产生抑制作用。

谷士艳等^[16]研究以餐厨垃圾和猪粪为主要原料联合厌氧消化过程中,分析比较了2种原料的配比、pH、TS体积分数这3种因素对联合厌氧消化产

气量的影响,发现当餐厨垃圾与猪粪配比为1:1,pH为7.11,TS为10.08%时,产气量达到最佳值30459.5 mL;而就单个因素对混合物联合厌氧消化产气量影响最大的是TS体积分数,其次是pH,相对来说不明显的是混合物的配比。

Tian等^[17]在研究餐厨垃圾与猪粪联合厌氧消化时发现,在餐厨垃圾与猪粪比例为1:0、5:1、3:1、1:1、1:3、1:5、0:1中,只有当其混合物比为1:1时,生物降解性达到最高为85.03%,甲烷产量为409.5 mL/g。在整个过程中,餐厨垃圾与猪粪联合厌氧消化没有出现明显的氨态氮抑制现象,是因为其混合物厌氧消化的氨态氮的接受范围为1380~2020 mL/L,一般都在可接受的范围内。

餐厨垃圾与猪粪进行联合厌氧消化也有助于垃圾厌氧消化,提高沼气产量。

4.2 餐厨垃圾与污泥联合厌氧消化

王永会等^[18]在以餐厨垃圾和剩余污泥为原料,在其混合物比为1:0、2:1、1:1、1:2、0:1,研究混合物联合厌氧消化和单独消化的系统性能、产甲烷潜力,发现较其单独厌氧消化,混合物联合厌氧消化明显提高沼气产量,当混合物比例为1:1时,沼气和甲烷产量分别达358.2、224.1 mL/g。

Gou等^[19]研究餐厨垃圾与污泥联合厌氧消化时,发现在有机负荷率为1 g/(L·d)时,55℃产气量最高,分别是35℃和45℃产气量的1.6和1.3倍,其相应的平均甲烷产气量为0.40、0.26、0.30 L/g。

Lin等^[20]研究餐厨垃圾与造纸污泥在中温下联合厌氧消化,发现混合物两者比为1:1,最大产氢量为64.48 mL/g,甲烷产量为432.3 mL/g,厌氧消化过程中未出现挥发性有机酸抑制现象。

Zhu等^[21]对混合原料两阶段联合厌氧消化进行了280 d的调查,发现餐厨垃圾与污泥配比为1:1,在两阶段能达到最大氢气和甲烷产率分别为0.93、9.50 mL,进行热处理(100℃,10 min)后的混合物甲烷产量明显高于未经过预处理的甲烷产量。

Vrieze等^[22]研究餐厨垃圾中的糖蜜与污泥联合厌氧消化,发现餐厨垃圾和1.01 L/(L·d)糖蜜与污泥混合厌氧消化甲烷产率达到1.53 L/(L·d),污泥起到了稳定作用和补充消化所需的各种营养素。

Duan等^[23]研究餐厨垃圾与脱水污泥混合消化,发现在进料基质中,随着底物浓度的增大,甲烷产率和产气量均较低;混合系统能稀释有毒化学物质如氨或Na⁺到很低水平,从而相对于垃圾或污泥单独厌氧消化系统表现出较高的稳定性。

餐厨垃圾与污泥联合厌氧消化在两者比为1:1时厌氧效果最好;还受温度、营养物质及底物浓度的影响。

4.3 餐厨垃圾与其他生物质联合厌氧消化

陈雪等^[24]研究了餐/草最佳混合比例相较于单一餐厨、稻草的产酸效果和产甲烷性能,发现当进料负荷为42.95 g/L,酸化时间为7.92 d,原料与微生物比为2.12:1,餐草混合比为3.88:1时,餐草联合厌氧的产酸效果最优,挥发性脂肪酸和乙醇总量达到了16844 mg/L,比单一餐草的最优条件组合所得总量提高了30.4%。

蒋滔等^[25]研究餐厨垃圾与玉米秸秆在不同配比下产气效果时,发现当餐厨垃圾与玉米秸秆以1:2配比时,CH₄的累积产量最大,平均能达到12741 mL,挥发性固体(VS)产CH₄率为299.9 mL/g。

许智等^[26]研究在发酵总固体浓度(TS)为16%条件下混合垃圾产气量效果时,发现稻秸与餐厨垃圾、人粪尿混合物质量比为1:1.72时,稻秸发酵总固体浓度(TS)产气量达到了377 mL/g,相较比例为1:3.44的产气量提高了7.71%,比单一稻秸的产气量高24.42%。

Yong等^[27]研究餐厨垃圾与秸秆混合产甲烷效果时,发现当餐厨垃圾与秸秆的比例为5:1时,甲烷产量高达0.392 m³/kg,比它们单独厌氧消化产生的甲烷要高39.5%和149.7%。

Pei等^[28]研究有机负荷率对餐厨垃圾与稻草联合厌氧消化影响,发现餐厨垃圾的增加会提高沼气产量和缩短停留时间,当餐厨垃圾与稻草比为3:1时,甲烷产量最高为60.55 mL/(g·d),相较于其单独厌氧消化产甲烷量要高出178%和78%。

Wan等^[29]研究餐厨垃圾和中国银草混合厌氧消化的效果,发现由于2种原材料混合形成的底物使得微生物多样性较单一材料的有所增加,这可能有益于沼气的生产。

卢艳阳等^[30]研究餐厨垃圾与毛竹叶混合厌氧消化效果,发现毛竹叶和餐厨垃圾组合厌氧消化的总产气量是餐厨垃圾单独产气量的3.28倍,混合厌氧消化的甲烷总产量达到了10.1 L。

以上可见,餐厨垃圾与其他生物质联合厌氧效果要强于其单一厌氧消化。

5 其他条件下厌氧消化情况

在恒温35℃,pH为7.0时,餐厨垃圾厌氧消化产沼气效率较好,总产气量达到了3692 mL,甲烷含

量超过了55%,对pH进行调控后,厌氧消化系统也未出现氨氮抑制现象^[31]。

而将餐厨垃圾进行15 min、100℃的热处理后,其厌氧消化累计产气量达到最高值2 782.8 mL,与未经过热处理的相比累计产气量提高了58.30%,产气高峰也比未经处理的提前了3 d^[32]。

食物垃圾与预处理后的污泥配比为2:1,经热、化学、超声波及它们的组合预处理后,最大产氢量为5 L/d^[33]。

综上,餐厨垃圾与其他物质联合厌氧消化产气效果要强于其单独厌氧消化。

6 结语

餐厨垃圾单独厌氧消化产甲烷量不高,且易发生挥发性有机酸和氨氮抑制现象。但其和牛粪、猪粪、污泥、秸秆联合厌氧消化不仅产甲烷量会较其单独厌氧消化要高,而且一定的混合物配比可以控制氨氮含量;控制有机负荷率同时,由于混合物所具有的缓冲、协同作用,可以很好的解决上述2种抑制现象。

餐厨垃圾与牛粪配比在2.5:1~2:1产气量效果最好,最佳pH为7.5,对其进行预处理和控制有机负荷率也可提高混合物的产气量;餐厨垃圾与猪粪联合厌氧消化,TS体积分数对其厌氧消化影响最大,当餐厨垃圾质量分数超过26%,会出现挥发性有机酸抑制现象,两者的最佳配比为1:1,此时产甲烷量效果最好;餐厨垃圾与污泥混合厌氧消化其最佳比为1:1,适合的有机负荷率和热处理都可提高混合厌氧消化产气量;餐厨垃圾和其他物质如秸秆、污水、毛竹叶联合厌氧消化产气量都较其单独消化效果要好,不仅产气量要高,而且混合厌氧消化较餐厨垃圾单独厌氧消化很少出现挥发性有机酸和氨氮抑制现象。

餐厨垃圾和其他生物质联合厌氧消化降低了垃圾对环境的影响程度,将其进行资源化处理,产生的甲烷是沼气的主要成分,而沼气是一种可代替一部分化石燃料的可再生能源,而且没有任何地域限制,也不需要先进的生产能源技术,可以简单地使用和应用。厌氧消化过程流出的液体存有一定毒素和致病菌,会导致二次污染;在消化过程中虽然出现氨氮抑制现象,但目前对会产生抑制的氨氮浓度没有统一标准,都需今后进行深入研究。

参考文献

[1] Ms T D E, Environment T E. Domestic food waste-the carbon and

financial costs of the options[J]. *Municipal Engineer*, 2012, 165(1):3-10.

- [2] Silvestre G, Gómez M P, Pascual A, *et al.* Anaerobic co-digestion of cattle manure with rice straw: Economic & energy feasibility[J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2013, 67(4):745-55.
- [3] Hollinshead W D, Varman A M, You L, *et al.* Boosting d-lactate production in engineered cyanobacteria using sterilized anaerobic digestion effluents[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 169(5):462-467.
- [4] Gao S, Huang Y, Yang L, *et al.* Evaluation the anaerobic digestion performance of solid residual kitchen waste by NaHCO₃ buffering[J]. *Energy Conversion & Management*, 2015, 93:166-174.
- [5] 刘子旭, 彭晶. 餐厨垃圾特性及处理技术研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(7):102-03.
- [6] Dorn T, Flamme S, Nelles M. A review of energy recovery from waste in China[J]. *Waste Manag Res*, 2012, 30(4):432-441.
- [7] Xu L F, Wu Y C. A Discussion on the priority areas for MSW classification recycling[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, (726-731):2614-2617.
- [8] 刘立凡, 廖永伟, 梁捷, 等. 我国餐厨垃圾处理技术与研究进展[J]. *广州化工*, 2014, 42(4):41-43.
- [9] 裴占江, 刘杰, 王粟, 等. 餐厨垃圾与牛粪联合厌氧消化效率研究[J]. *中国沼气*, 2014, 32(4):3-7.
- [10] Quiroga G, Castrillón L, Fernández-Nava Y, *et al.* Effect of ultrasound pre-treatment in the anaerobic co-digestion of cattle manure with food waste and sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 154(2):74-79.
- [11] 李轶, 李磊, 熊菊元, 等. 餐厨垃圾与牛粪混合厌氧发酵最佳配比筛选[J]. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43(5):566-570.
- [12] Li R, Chen S, Li X. Biogas production from anaerobic co-digestion of food waste with dairy manure in a two-phase digestion system[J]. *Applied Biochemistry & Biotechnology*, 2010, 160(2):643-654.
- [13] Zhai N, Tong Z, Yin D, *et al.* Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure[J]. *Waste Management*, 2015, 38(2):126-131.
- [14] Iqbal S A, Rahaman S, Rahman M, *et al.* Anaerobic digestion of kitchen waste to produce biogas[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 90:657-662.
- [15] Ye J, Dong L, Sun Y, *et al.* Improved biogas production from rice straw by co-digestion with kitchen waste and pig manure[J]. *Waste Manag*, 2013, 33(12):2653-2658.
- [16] 谷士艳, 于美玲, 寇巍, 等. 猪粪与餐厨废弃物混合厌氧消化工艺优化研究[J]. *可再生能源*, 2015, 33(2):308-311.
- [17] Tian H, Na D, Cong L, *et al.* Anaerobic co-digestion of kitchen waste and pig manure with different mixing ratios[J]. *Journal of Bioscience & Bioengineering*, 2015, 120(1):1-20.
- [18] 王永会, 赵明星, 阮文权. 餐厨垃圾与剩余污泥混合消化产沼气协同效应[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(6):2536-2541.
- [19] Gou C, Yang Z, Jing H, *et al.* Effects of temperature and organic loading rate on the performance and microbial community of anaerobic co-digestion of waste activated sludge and food waste[J]. *Chemosphere*, 2014, 105(3):146-151.

通常用于 MTP 工艺过程中^[10-11]。

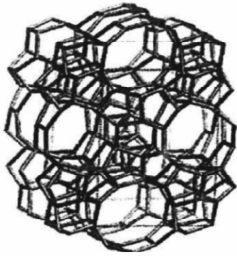


图2 ZSM-5 分子筛结构示意图

2.1.2 SAPO-34 催化剂

1984年,UCC公司开发了磷酸硅铝系列分子筛,性能最为突出的是SAPO-34。该分子筛由 PO_4 、 AlO_4 和 SiO_4 四面体相互连接构成,具有八圆环的椭球形笼状和三维孔道结构,如图3所示^[11-12]。该分子筛的孔径比ZSM-5分子筛更小,甲醇制烯烃反应中乙烯和丙烯的产率显著增加, C_5+ 组分的含量显著减少,几乎不产生芳烃,通常用于MTO工艺过程中^[13-14]。

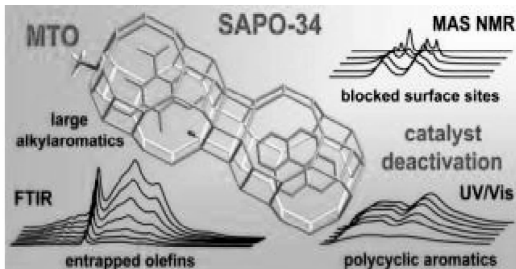


图3 SAPO-34 分子筛结构示意图

目前,SAPO 催化剂是主流催化剂,但也有人研究其他新型催化剂,如具有 RHO 结构的 SAPO 类型的 SRM-2 分子筛。但这些新催化剂在反应活性、选择性以及制备方法等方面存在一定的不足,在短时间内还不能够取代 SAPO-34 催化剂^[7,12]。

2.2 MTO 催化剂工业化进程

2.2.1 大连化物所 D-MTO 催化剂

中国科学院大连化学物理研究所研发了性能优异的 SAPO-34 催化剂。该催化剂适于高线速度或大空速条件下操作,易再生,具有优异的热稳定性和水热稳定性。考核阶段的实验结果表明,甲醇转化率 99.84%,乙烯和丙烯选择性达 79.13%,乙烯、丙烯和丁烯选择性为 90.21%。2005 年 11 月,正大集团与中国科学院大连化学物理研究所合作,在大连建立了生产能力为 2 000 t/a 的甲醇制烯烃催化剂厂。目前,D-MTO 催化剂已经在神华包头甲醇制烯烃等多套装置中使用^[6,15]。

2.2.2 中石化 S-MTO 催化剂

中石化上海石油化工研究院于 2000 年开始研究甲醇制烯烃技术,同时展开了催化剂生产技术的开发,陆续申请了用氟化氢—三乙胺复合模板剂、双模板剂合成 SAPO-34 分子筛的专利。通过对模板剂混合比例、表面活性剂加入量、加料顺序以及成型技术的研究,开发出的 SAPO-34 催化剂具有较高的结晶度和催化性能。2004—2006 年,中国石化 SAPO-34 催化剂工业放大生产成功;2005—2006 年,

(上接第 37 页)

[20] Lin Y, Wu S, Wang D. Hydrogen-methane production from pulp & paper sludge and food waste by mesophilic-thermophilic anaerobic co-digestion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(35):15055-15062.

[21] Zhu H, Parker W, Conidi D, et al. Eliminating methanogenic activity in hydrogen reactor to improve biogas production in a two-stage anaerobic digestion process co-digesting municipal food waste and sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(14):7086-7092.

[22] Vrieze J D, Plovie K, Verstraete W, et al. Co-digestion of molasses or kitchen waste with high-rate activated sludge results in a diverse microbial community with stable methane production[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 152:75-82.

[23] Duan N N, Dong B, Jiang-Hua L I, et al. High-solids anaerobic Co-digestion of sludge and kitchen garbage under mesophilic conditions[J]. Environmental Science, 2013, 34(1):321-327.

[24] 陈雪,袁海荣,邹德勋,等.餐厨垃圾和稻草两相厌氧发酵及其动力学[J].环境工程学报,2015,9(5):2406-2410.

[25] 蒋滔,李平,任桂英,等.餐厨垃圾与玉米秸秆混合中温发酵产气效果模拟[J].生态与农村环境学报,2015,31(1):124-130.

[26] 许智,叶小梅,常志州,等.稻秸、餐厨垃圾及人粪尿混合厌氧发酵[J].环境工程学报,2012,6(7):2447-2453.

[27] Yong Z, Dong Y, Zhang X, et al. Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production[J]. Renewable Energy, 2015, 78:527-530.

[28] Pei Z J, Liu J, Shi F M, et al. High-solid anaerobic Co-digestion of food waste and rice straw for biogas production[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 21(4):61-66.

[29] Wan S, Sun L, Sun J, et al. Biogas production and microbial community change during the Co-digestion of food waste with chinese silver grass in a single-stage anaerobic reactor[J]. Biotechnology & Bioprocess Engineering, 2013, 18(5):1022-1030.

[30] 卢艳阳,张又弛,唐晓达,等.竹叶与餐厨垃圾厌氧共消化工艺[J].环境工程学报,2015,9(1):407-412.

[31] 裴占江,刘杰,王粟,等.pH 值调控对餐厨垃圾厌氧消化效率的影响[J].中国沼气,2015,33(1):17-21.

[32] 任连海,黄燕冰,王攀,等.热处理时间对餐厨垃圾高温干式厌氧发酵的影响[J].环境工程学报,2015,9(2):90-906.

[33] Kim S, Choi K, Kim J O, et al. Biological hydrogen production by anaerobic digestion of food waste and sewage sludge treated using various pretreatment technologies[J]. Biodegradation, 2013, 24(6):753-764. ■